



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Generación de secuencias de montaje y equilibrado de líneas

Liliana Capacho Betancourt, Rafael Pastor Moreno

*IOC-DT-P-2004-04
Abril 2004*



Doctorado Automatización Avanzada y Robótica



Liliana Capacho Betancourt, Rafael Pastor Moreno

Barcelona, España - Abril de 2004

Índice

Índice de figuras, diagramas y tablas.	2
Introducción	3
I. Estado del Arte.	5
1.1. Introducción.	5
1.2. Líneas de montaje.	5
1.2.1. Conceptos básicos.	6
1.2.2. Tipos de las líneas de montaje.	6
1.3. Problemas de equilibrado de líneas de montaje (ALBP).	12
1.4. Problemas de diseño de líneas de montaje (ALDP).	14
1.5. Algoritmos de resolución de problemas de diseño y equilibrado de líneas.	15
1.6. Secuenciación de tareas con rutas de montaje alternativas.	17
1.6.1. Problemas de manufactura flexible.	17
1.6.2. Sistemas de manufactura celular con planes de proceso alternativos.	18
1.7. Problemas de equilibrado de líneas que consideran elementos alternativos.	18
1.7.1. Equilibrado de líneas con alternativas de proceso.	18
1.7.2. Problemas con herramientas de manufactura alternativas.	20
1.7.3. Asignación de tareas fijas y tareas flotantes.	20
1.7.4. Problemas con estaciones alternativas	21
1.7.5. Problema de equilibrado con rutas alternativas.	21
II. Análisis del estado del arte.	22
III. Problema de equilibrado de líneas con rutas alternativas y tiempos variables.	24
3.1. Introducción.	24
3.2. Definición del problema.	24
3.3. Caracterización del problema.	27
Conclusiones	28
Referencias	29

Índice de figuras, diagramas y tablas.

Figuras:

Figura 1.1. Línea de montaje.	5
Figura 1.2. Línea de montaje simple.	6
Figura 1.3. Línea de montaje mixta.	7
Figura 1.4. Línea de montaje multi-modelo.	7
Figura 1.5. Línea serial.	7
Figura 1.6. Línea con estaciones paralelas.	8
Figura 1.7. Líneas paralelas.	8
Figura 1.8. Líneas de dos lados.	8
Figura 1.9. Líneas circulares o cerradas.	9
Figura 1.10. Línea tipo U.	9
Figura 1.11. Línea sincrónica.	9
Figura 1.12. Línea de montaje asincrónica.	9
Figura 1.13. Líneas de alimentación	10
Figura 1.14. Línea de montaje manual.	10
Figura 1.15. Diagramas de precedencias con procesos alternativos.	19
Figura 1.16. Diagrama de tareas fijas y tareas flotantes.	20
Figura 3.1. Esquema de montaje de una linterna.	24
Figura 3.2. Diagrama de precedencias alternativos	25
Figura 3.3. Rutas alternativas para el problema de carenado de moto.	26

Diagramas:

Diagrama 1.1. Tipos de líneas de montaje.	11
Diagrama 1.2. Problemas de equilibrado de líneas de montaje.	12

Tablas:

Tabla 1.1. Tipos de problemas ALB.	14
Tabla 1.2. Datos y resultados del ejemplo de equilibrado con alternativas de proceso.	19
Tabla 3.1. Datos y resultados del ejemplo 3.1.	25
Tabla 3.2. Datos del ejemplo 3.2.	26
Tabla 3.3. Resultados del ejemplo 3.2.	27

Introducción

Las líneas de montaje, elemento fundamental en muchos sistemas productivos, están compuestas por un conjunto finito de estaciones de trabajo y de tareas, que tienen asignado un tiempo de proceso, y un conjunto de relaciones de precedencias, que especifican el orden de proceso permitido de las tareas. Básicamente, el problema de equilibrado de líneas consiste en asignar las tareas a la secuencia ordenada de las estaciones, de tal manera que se satisfagan las relaciones de precedencia y se optimice una función objetivo, como por ejemplo minimizar el número de estaciones.

La clasificación clásica de los problemas de equilibrado de líneas distingue dos tipos principales: el simple (SALBP - *simple assembly line balancing problem*) y el general (GALBP - *general assembly line balancing problem*). Como su nombre indica, los SALBPs incluyen los problemas mas simples, en los que los parámetros de entrada son todos conocidos, se consideran líneas de montaje simples (estaciones colocadas en serie), ensamblan un solo tipo de producto, consideran tiempos de proceso determinísticos y conocidos a priori (además, independientes de la secuencia de proceso de las tareas), las relaciones de precedencias son conocidas y fijas, las estaciones pueden realizar cualquier tarea y las tareas pueden ser procesada en cualquier estación.

Los problemas de equilibrado de líneas (ALBPs) han sido ampliamente estudiados, principalmente el caso simple (SALBP). Dada su naturaleza combinatoria, estos problemas son muy difíciles de resolver de forma óptima, en especial los GALPBs. En el caso de problemas industriales, su resolución se complica debido al gran número de tareas que componen el proceso productivo y al gran número de restricciones presentes en los problemas reales.

En este trabajo se plantea un problema general de equilibrado de líneas con rutas de montaje alternativas, en el que se consideran conjuntamente el proceso de selección de la ruta y el equilibrado de la línea; es decir, se dispone de relaciones de precedencias alternativas entre tareas, una por cada variante o ruta de montaje. En el problema, además se considera que los tiempos de proceso de las tareas no son fijos, sino que dependen del orden en el que las tareas son procesadas, es decir, dependen de la alternativa de montaje seleccionada.

Bajo estas consideraciones, se requiere resolver simultáneamente dos subproblemas: uno, seleccionar la ruta en la que se ejecutaran las tareas (cuando hay más de una variante o ruta) y dos, equilibrar la línea, lo que implica asignar las tareas a las estaciones de manera que, dado un tiempo ciclo, permita minimizar el número de estaciones requeridas para procesarlas. Se considera que la posibilidad de disponer de rutas de montaje alternativas del producto, no solo permite el tratamiento de problemas más reales sino que también favorece la asignación de tareas para optimizar el objetivo planteado.

Al considerar rutas alternativas, se impone al problema de equilibrado un nivel de complejidad mayor. Sin embargo, dado que en la realidad se puede disponer de rutas de montaje alternativas, este planteamiento posibilita el tratamiento de otra variante de problemas de equilibrado. En el caso contrario, cuando no se tienen en cuenta las repercusiones que podría tener una ruta de montaje alternativa en el equilibrado, el sistema se sub-optimiza, ya que una alternativa puede ser descartada por tener, por ejemplo, un tiempo de proceso total mayor, cuando en realidad nos puede proporcionar la mejor solución del problema (es decir, requiere menos estaciones).

Los trabajos que contemplan casos generales no son muy numerosos, aun son más escasos los que consideran aspectos, bien sea de diseño o de proceso, alternativos; en este trabajo, se analizan los procedimientos y enfoques que han sido usados para resolver este tipo de problemas.

El resto de este trabajo esta estructurado de la siguiente forma: en la primera parte se hace una introducción a las líneas de montaje, conceptos básicos y tipos de líneas; se presenta una clasificación de los problemas de equilibrado de líneas y un estado del arte de los métodos y enfoques usados para resolver este tipo de problemas, enfatizando en aquellos que contemplan aspectos alternativos; además, también se hace una introducción al problema que se plantea en este trabajo. En la segunda parte, se realiza un análisis del estado del arte, en donde se compara el problema de equilibrado propuesto con otros problemas que consideran flexibilidad de rutas (rutas de montaje alternativas); la idea principal en esta parte es indagar, si hay alguno, los enfoques y procedimientos usados para resolver el problema propuesto. En la tercera parte, se presenta detalladamente el problema que se enfoca en este trabajo, en el que se considera, conjuntamente al proceso de equilibrado, el proceso de decisión acerca de la ruta de montaje. Finalmente, se presentan las conclusiones y las referencias bibliográficas.

I. Estado del Arte

1.1. Introducción

En esta primera parte se hace una introducción a las líneas de montaje, se presenta un resumen de los problemas de equilibrado de líneas considerados en la literatura, así como los enfoques y métodos usados para resolverlos, y se destacan problemas que contemplan aspectos alternativos, como por ejemplo rutas de montaje alternativas.

1.2. Líneas de montaje.

Las líneas de montaje fueron introducidas, en la era industrial, por Eli Whitney quien inventó el sistema de manufactura americano en 1799, usando ideas de la división del trabajo y tolerancia en ingeniería, para crear ensamblados de partes de una manera repetitiva. Sin embargo, la idea de líneas de montaje no era nueva, ésta fue desarrollada en Venecia cientos de años antes, en donde los barcos eran producidos en masa usando partes pre-manufacturadas: el Arsenal de Venecia producía cerca de un barco por día en lo que podría considerarse la primera línea de manufactura del mundo. En 1913, Henry Ford instaló la primera línea de montaje móvil con la idea de disminuir costos y permitir la producción masiva¹.

En una línea de montaje (ver figura 1.1) un conjunto de piezas son agregadas de manera predefinida para crear un determinado producto (final o intermedio). Para llevar a cabo el proceso de montaje se dispone de cierto número de estaciones, se consideran un grupo de especificaciones que relacionan las tareas (relaciones de precedencia, incompatibilidad o afinidad entre tareas, y relación de paralelismo [Plans99]), y se contempla un tiempo para procesar las tareas en cada estación.



Figura 1.1. Línea de montaje.

A continuación se definen algunos conceptos que definen y caracterizan a las líneas de montaje.

¹ Tomado de Assembly line Wikipedia [Wikipedia03].

1.2.1. Conceptos básicos².

❖ Tarea: es una unidad de trabajo indivisible j que tiene asociado un tiempo de proceso t_j . El trabajo total requerido para manufacturar un producto en una línea se divide en un conjunto de n tareas $V = \{1, \dots, j, \dots, n\}$.

❖ Relaciones de precedencia: están definidas por las restricciones sobre el orden en el cual las operaciones pueden ser ejecutadas en la línea de montaje. De esta forma, una tarea no puede procesarse hasta que no se hayan procesado todas las que le preceden de forma inmediata. Los diagramas de precedencias se usan para representar las relaciones de precedencia.

❖ Estación: es la parte k de la línea de montaje en donde se ejecutan las tareas; pueden estar compuestas por un operador (humano o robotizado), cierto tipo de maquinaria y equipos o mecanismos de proceso especializados.

❖ Tiempo de ciclo: c es el tiempo disponible en cada estación para completar las tareas asignadas para una unidad de producto. Puede ser el tiempo máximo o el tiempo promedio disponible para cada ciclo de trabajo.

❖ Carga de trabajo: es el conjunto S_k de tareas asignadas a la estación k .

❖ Tiempo de cada estación: es la suma de los tiempos de todas las tareas asignadas a una estación:

$$t(S_k) = \sum_{j \in S_k} t_j.$$

❖ Tiempo de estación libre: es la diferencia entre el tiempo ciclo y el tiempo de estación: $c - t(S_k)$.

La forma de procesar las piezas, la manera como están dispuestas las estaciones en la línea y la cantidad de tipos de productos que se ensamblan, son los aspectos principales que se consideran en la literatura para clasificar las líneas de montaje. La clasificación que se presenta a continuación resume las planteadas por Becker y Scholl [Becker03a], Scholl [Scholl99a] y Plans [Plans99].

1.2.2. Tipos de líneas de montaje.

Las líneas de montaje se pueden clasificar de la siguiente manera:

a. De acuerdo al tipo de producto que procesan:

❖ Simples: se procesa un solo tipo de producto y las estaciones ejecutan repetidamente las mismas tareas (fig. 1.2).

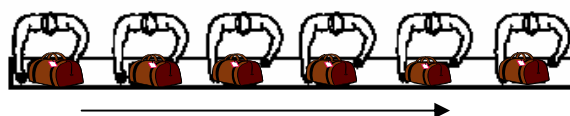


Figura 1.2. Línea de montaje simple.

² Estos conceptos están basados principalmente en el capítulo I de Scholl [Scholl99a] y en los artículos de Pinto et al. [Pinto83] y Becker y Scholl [Becker03a].

❖ **Mixtas:** se producen variantes de un producto básico, la producción no implica tiempos de *setup* entre una variante y otra, dado que se requieren las mismas operaciones básicas para producir todas las variantes; por tanto, se producen unidades de diferentes modelos en una secuencia mixta arbitraria (fig. 1.3.).



Figura 1.3. Línea de montaje mixta.

❖ **Multi-modelos:** se pueden fabricar diferentes tipos de productos en una misma línea, pero en este caso, los procesos de producción entre un tipo de producto (o modelo) y otro varían significativamente por lo que se producen secuencias de lotes; además, se consideran tiempos de *setup* entre lotes (fig. 1.4).



Figura 1.4. Línea de montaje multi-modelo.

b. De acuerdo a los tiempos de duración de las tareas:

- ❖ **Determinísticas:** todos los tiempos de proceso de las tareas son conocidos con certeza.
- ❖ **Estocásticas:** la duración de una o más tareas es aleatoria o probabilística dado que la variabilidad en su tiempo de proceso es significativa.
- ❖ **Dependientes:** el tiempo de duración de una tarea depende, por ejemplo, del tipo de estación a la que ha sido asignada, del tipo de operador o de la secuencia.

c. De acuerdo a la arquitectura de la línea:

❖ **Línea serial:** se tienen estaciones simples colocadas en serie, en donde las tareas pasan consecutivamente de una estación a la próxima, por ejemplo, a través de una cinta transportadora (fig. 1.5).

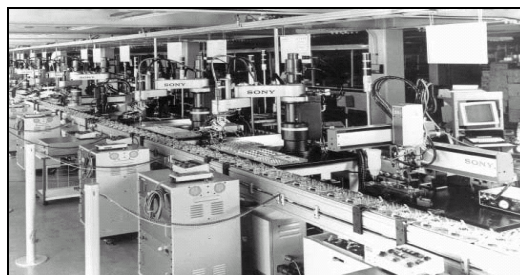


Figura 1.5. Línea serial³.

❖ **Línea con estaciones en paralelo:** es una sola línea en la que se permiten estaciones en paralelo (fig. 1.6); esto es, se tiene dos o más estaciones idénticas que realizarán en paralelo las mismas tareas, por tanto, los equipos requeridos para ejecutar las tareas deben instalarse tantas veces como estaciones en paralelo.

³ Sistema de montaje de VCR Sony.

Estaciones en paralelo pueden ser usadas para solucionar el problema que se presenta cuando el tiempo de alguna tarea es mayor que el tiempo de ciclo, ya que el valor promedio de la duración de la tarea se reduce proporcionalmente al número de estaciones.

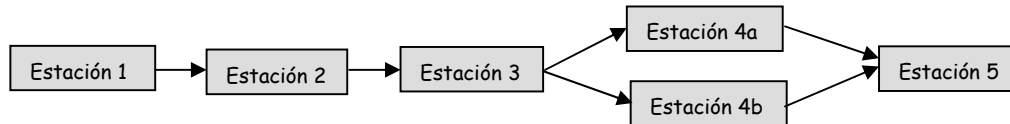


Figura 1.6. Línea con estaciones paralelas.

❖ Líneas paralelas: son varias líneas colocadas en paralelo (fig. 1.7); este tipo de configuración puede ser muy útil para el caso de modelos múltiples, en el que se asigna una línea para cada modelo o para cada familia de modelos. En el caso de líneas en paralelo se tiene un problema de diseño adicional: decidir cuántas líneas serán instaladas y cómo será distribuido el equipo y la fuerza de trabajo entre dichas líneas.



Figura 1.7. Líneas paralelas.

❖ Líneas de dos lados: consisten en dos líneas seriales en paralelo; en donde, en lugar de una estación simple, se tienen pares de estaciones opuestas en cada lado de la línea (estación derecha y estación izquierda) que procesan simultáneamente una misma pieza. Aunque puede ser usado para cualquier tipo de producto, las líneas de dos lados suelen implantarse para productos grandes en los que se requieren desarrollar tareas en ambos lados, un ejemplo clásico se presenta en la industria automovilística, en donde se deben realizar las mismas tareas en ambos lados del automóvil (ej. colocar las puertas, ruedas y espejos), tal como se muestra en la figura 1.8. De esta manera, algunas tareas pueden ser asignadas a un lado de línea, otras pueden ser asignadas de manera indiferente a cualquiera de los lados y otras deben ser asignadas a ambos simultáneamente.

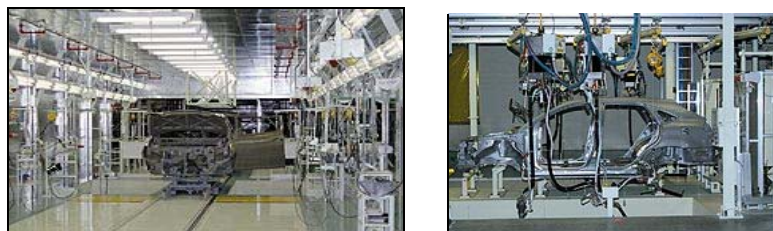


Figura 1.8. Líneas de dos lados⁴.

⁴ Línea de montaje Toyota Lexus, Canada.

The diagram illustrates the Headlamp Assembly System layout. It features a central yellow rectangular area labeled "HEADLAMP ASSEMBLY SYSTEM". Surrounding this central area are various workstations and material handling points, each represented by a small icon of a worker or machine. The stations are arranged as follows:

- Top Edge (Left to Right):** HOODING, Sub. 1, LANE 1, LANE 2, LANE 3, CRASH C, CRASH B, DOME 2, DOME 1, LANE 4, LANE 5, ALUMIN, Sub. 6, Sub. 7, Sub. 8.
- Right Edge (Bottom to Top):** LOOKOUT ROOM, Pallet 2, Pallet 1.
- Bottom Edge (Left to Right):** Material Unload, LANE 6, Suspended, LANE 7, Material City, Private Stage, Plastic Case, LIBR 1, Powder, Felt Cloth, Powder, LIBR 2, LIBR 3.
- Left Edge (Bottom to Top):** MATERIAL LOGE.

Inside the central yellow area, there are two blue rectangular regions labeled "Pallet 1" and "Pallet 2". Arrows indicate the flow of materials between these stations and pallets.

Figura 1.9. Líneas circulares o cerradas.

Figura 1.10. Línea tipo U^5 .

A schematic diagram of a multi-axle vehicle, such as a train or tram, positioned on a set of tracks. The vehicle consists of a series of rectangular carriages, each with two wheels. A horizontal arrow points to the right, indicating the direction of travel. A sensor, represented by a small rectangle with a vertical line, is located on the track surface, positioned to detect the vehicle's position.

Figura 1.11. Línea sincrónica⁵.

Diagrama de un sistema de producción con tres estaciones de trabajo (Estación 1, Estación 2, Estación 3) y buffers. Las estaciones están representadas por iconos de máquinas. Los buffers son representados por círculos verdes con la palabra "buffer" en el interior. Las estaciones están conectadas por líneas que representan el flujo de material. El número 4 está presente en la parte inferior derecha del diagrama.

⁵ Figura tomada de Lee [Lee00].

❖ Líneas de alimentación, se pueden diseñar sistemas de montaje compuestos en los que tiene una o más **líneas de alimentación (feeder lines)**, en las que se realizan sub-ensamblados; es decir, se tiene una línea principal en donde se van montando las piezas y líneas suplementarias que pre-procesan ciertas partes, para luego alimentar con productos intermedios a la línea de montaje principal, tal como se puede ver en la figura 1.13. En los problemas que consideren este tipo de línea se presenta, junto al problema de equilibrar la línea, el problema de sincronizar la tasa de producción de las líneas de alimentación.

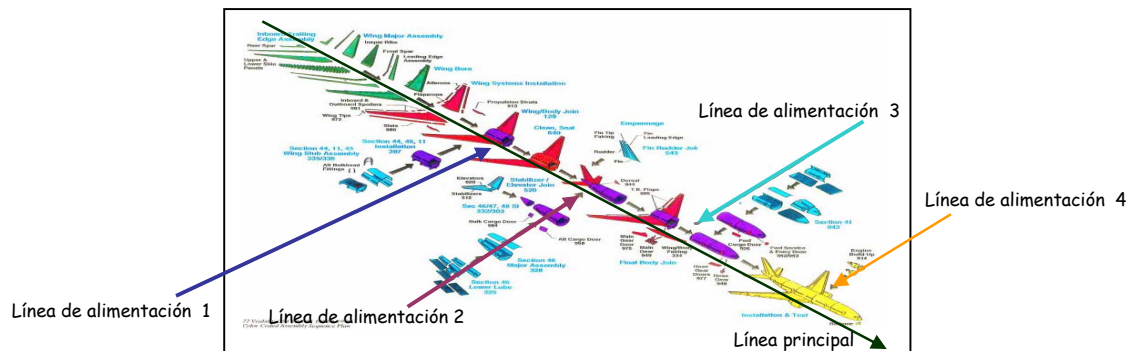


Figura 1.13. Líneas de alimentación⁶.

e. De acuerdo al tipo de operador:

❖ Líneas manuales: este tipo de línea, que puede o no ser automatizada, tiene operadores humanos⁷, tal como se puede observar en la figura 1.14.



Figura 1.14. Línea de montaje manual.

❖ Líneas Robotizadas: son líneas en las que los operadores son robots y los procesos son totalmente automatizados. Cuando se tiene este tipo de línea, además de planificar el procesamiento de las tareas en las estaciones, se deben planificar las actividades de los robots.

⁶ Dibujo tomado de [Witney03].

⁷ Por ejemplo, las motocicletas Harley Davidson son ensambladas 100 % a mano.

f. De acuerdo a la disciplina de entrada de las piezas a la línea:

- ❖ Líneas de entrada fija: las piezas llegan a la línea a intervalos regulares, en el caso de líneas sincrónicas este intervalo es el tiempo de ciclo c .
- ❖ Líneas de entrada variables: la tasa de entrada de las piezas a la línea es variable.

Los tipos de líneas descritos previamente se pueden resumir en el diagrama 1.1:

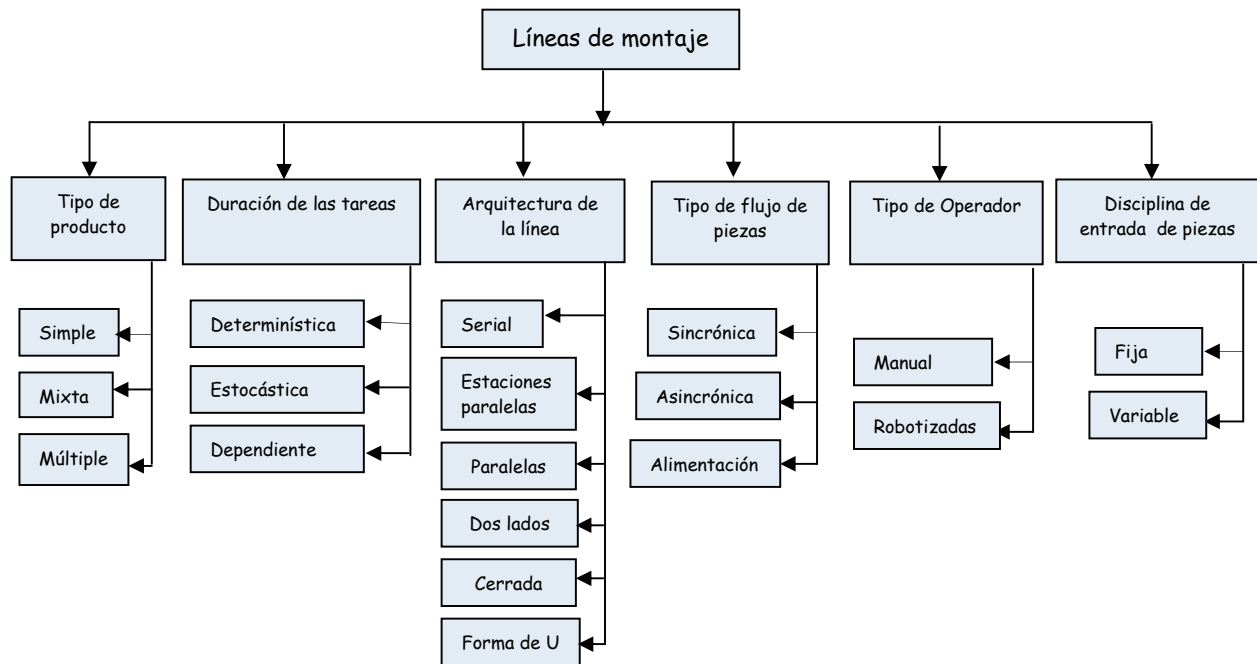


Diagrama 1.1. Tipos de líneas de montaje.

Es evidente, dada la variedad de características e implicaciones de cada una, que cada tipo de línea de montaje determina, en gran medida, el tipo de problema que se debe resolver. La definición de un problema queda entonces establecida considerando, además, el objetivo que se desea alcanzar dentro de la organización. Los problemas más comunes encontrados en la literatura son los de equilibrado (ALBP) y los de diseño de líneas (ALDP). Sin embargo, también pueden encontrarse problemas en los que se quiere equilibrar líneas de desmontaje (DLBP), en cuyo caso se tiene cierto producto ensamblado y se quiere decidir el orden de ejecución de las tareas que permitan desmontarlo eficientemente. En este trabajo solo se consideran problemas relacionados con diseño y equilibrado de líneas de montaje.

1.3. Problemas de equilibrado de líneas de montaje (ALBP).

Tal como se ha mencionado previamente, los problemas de equilibrado consisten en distribuir las tareas necesarias para ensamblar un producto a través del conjunto de estaciones que componen la línea de montaje. Varias restricciones y diferentes objetivos pueden ser considerados. En los problemas clásicos se requiere encontrar el número mínimo de estaciones o el tiempo de ciclo mínimo requerido para procesar un cierto número de tareas, piezas o componentes, de manera que se optimice una medida de eficiencia específica mientras se mantienen las relaciones de precedencias de las tareas. De acuerdo con Baybars [Baybars86], una línea se considera equilibrada sí, utilizando los recursos al máximo, la suma de los tiempos libres de las estaciones es lo más pequeño posible; además, si las tareas pueden ser agrupadas de manera que los tiempos de todas las estaciones sean exactamente iguales, se dice que la línea tiene un equilibrio perfecto, lo que en realidad es muy difícil de conseguir. En el caso contrario, Baybars considera que la tasa de producción efectiva de la línea está determinada por la estación más lenta, esto es, la estación cuello de botella.

Existen variadas modelizaciones de los problemas de equilibrado de líneas, que permiten describir los aspectos particulares considerados en cada uno. En este sentido, Plans [Plans99] propone una nomenclatura general para modelar diversos casos; dicha propuesta está basada en una codificación compuesta por cinco campos: el primer campo especifica el tipo de línea según el producto (simple, mixta o múltiple), si hay o no estaciones en paralelo, si hay *buffers* y la forma de la línea; en el segundo se especifican la duración de las tareas (determinística, probabilística o dependiente), si se consideran tiempos de *setup* y el tiempo que le toma a un operador movilizarse; en el tercero se representan las restricciones entre tareas (de precedencia, incompatibilidad, afinidad o paralelismo) y se especifica si las estaciones son iguales o no; el cuarto especifica si el producto se puede mover (ej. rotar) sobre la línea; y el último campo especifica el tipo de problema (asignar las tareas a las estaciones, determinar la configuración de la línea o calcular el número de estaciones) y los objetivos.

Existen varias clasificaciones de los problemas de equilibrado de líneas, las más conocidas son las propuestas por Baybars [Baybars86] en la que se distinguen dos tipos de problemas clásicos: el Simple (SALBP) y el General (GALBP); y la de Ghosh y Gagnon [Ghosh89] en la que plantean cuatro categorías de modelos de equilibrado de líneas: modelo simple determinístico, modelo simple estocástico, modelo multi/mixto determinístico y modelo simple multi/mixto estocástico.

La siguiente clasificación (ver diagrama 1.2) recopila las propuestas de Baybars [Baybars86], Ghosh y Gagnon [Ghosh89] y también las de Graves [Graves83], Scholl [Scholl99a], Plans [Plans99], Pinto [Pinto83], Rekiek [Rekiek02], Becker y Scholl [Becker03a] y Becker y Scholl [Becker03b].

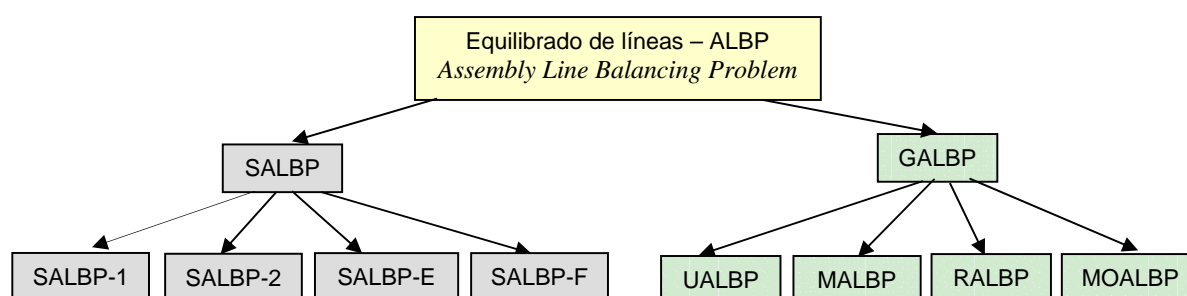


Diagrama 1.2. Problemas de equilibrado de líneas de montaje.

Como se ha introducido, los problemas de equilibrado de líneas se dividen en dos grupos:

a. SALBP: Simple assembly line balancing problem - Problema simple de equilibrado de líneas.

Los SALBP engloban los problemas de equilibrado más simples y están caracterizados de la siguiente manera: consideran líneas simples, sólo se consideran restricciones de precedencia, se asume que las tareas son indivisibles, los tiempos de proceso de las tareas son considerados independientes de la estación y del orden de proceso, son determinísticos y conocidos a priori, así como todos los parámetros de entrada, la línea es sincrónica, se tiene un tiempo de ciclo (o un número de estaciones) fijo, la arquitectura de la línea es serial con todas las estaciones igualmente equipadas para realizar cualquiera de las tareas y la tasa de entrada de las piezas a la línea es fija.

Se distinguen cuatro casos de SALBP:

1. **SALBP-1**: consiste en asignar un conjunto de tareas a las estaciones de tal forma que se minimice el número de estaciones, dado un tiempo de ciclo (o tasa de producción). Este caso se presenta habitualmente cuando un nuevo sistema de montaje va a ser instalado y la demanda externa puede ser estimada.
2. **SALBP-2**: se busca minimizar el tiempo de ciclo (o maximizar la tasa de producción), dado un número de estaciones fijo. Se considera que la línea de montaje ya existe.
3. **SALBP-E**: maximiza la eficiencia E de la línea, esto es, minimiza el producto de m (número de estaciones) por c (tiempo de ciclo).
4. **SALBP-F**: consiste en determinar si existe alguna solución factible para la combinación de un número m de estaciones y un tiempo de ciclo c ; es decir, se quiere conocer si la línea puede operar con m estaciones y un tiempo de ciclo c dados.

b. GALBP: General assembly line balancing problem - problema general de equilibrado de líneas.

Los GALBP engloban a todos los problemas de equilibrado de líneas que no son SALBP, como por ejemplo estaciones en paralelo, modelos mixtos, tiempos de proceso variables, procesamientos alternativos, etc.; de esta manera se pueden formular y resolver problemas más reales.

Dentro de la variedad de problemas GALBP se destacan cuatro tipos:

1. **UALBP: U-line assembly line balancing problem - problema de equilibrado de líneas tipo U.**

Los UALBP están caracterizados de manera similar a los problemas SALBP pero consideran una línea tipo U en lugar de una serial. La disposición de las estaciones en una línea U hace que los UALBPs sean más flexibles que los SALBPs dado que, en estos últimos, únicamente se pueden asignar aquellas tareas cuyos predecesores han sido asignados, mientras que en el UALBP se pueden asignar las tareas cuyos predecesores o sucesores ya hayan sido asignados. Las estaciones pueden ser colocadas de tal manera que, durante el mismo tiempo de ciclo, se puedan manejar a la vez dos piezas en diferentes posiciones de la línea [Becker03b]. Esto implica que hay un mayor número de posibilidades de asignar las tareas a las estaciones, lo que resulta, en algunos casos (ej. [Ajenblit03] y [Bartholdi93]) que el problema se pueda resolver de manera más eficiente que cuando se tiene un línea simple. De manera similar a los problemas simples SALBP, se distinguen los problemas UALBP-1, UALBP-2 y UALBP-E, en donde se busca minimizar

el número de estaciones, minimizar el tiempo de ciclo y maximizar la eficiencia de la línea U, respectivamente.

2. **MALBP: mixed-model assembly line balancing problem - problema de equilibrado de líneas de modelos mixtos.**

Este tipo de problemas se presentan cuando se consideran varios modelos de un mismo producto y, por lo tanto, se tiene un conjunto de tareas básicas que se realizan en todos los modelos sin considerar tiempos de *setup*. En este caso, también se tiene el problema de secuenciación de los diferentes modelos así como el problema de determinar el tamaño de los lotes de cada modelo; la secuenciación puede ser importante dado que los tiempos de tareas entre modelos pueden variar significativamente [Becker03b]. También se tienen las versiones MALPB-1, MALBP-2 y MALBP-E.

3. **RALBP: robotic assembly line balancing problem - problema de equilibrado de líneas robotizadas.**

En este tipo de problemas se considera tanto la asignación de las tareas como la asignación de un [conjunto de] robot[s] a las estaciones de trabajo, con la finalidad de optimizar la realización de las tareas en la línea.

4. **MOALBP: multi-objective assembly line balancing problem - problema de equilibrado de líneas con objetivos múltiples.**

En este tipo de problemas se consideran varios objetivos simultáneamente como por ejemplo: minimizar el número de estaciones, el coste total de montaje o el número de *buffers*; maximizar la eficiencia de línea, etc. De acuerdo con Rekiek et al. [Rekiek02] la mayoría de los problemas de equilibrado de líneas consideran múltiples objetivos.

Los dos tipos de problemas de equilibrado, SALBP y GALBP, se pueden, a su vez, subdividir de acuerdo con:

1. El tipo de producto procesado en la línea: modelo simple (SM) y modelo mixto o múltiple (MM).
2. La variabilidad del tiempo de duración de las tareas: determinístico (D) y estocástico (S).

Considerando estos aspectos, se generan varias versiones de los problemas ALBPs, los cuales se pueden esquematizar en la tabla 1.1 de la siguiente manera:

Tiempo de la tarea	Tipo de producto ensamblado	
	Simple	Mixto/múltiple
Determinístico	SALBP-SMD	SALBP-MMD
	GALBP-SMD	GALBP-MMD
Estocástico	SALBP-SMS	SALBP-MMS
	GALBP-SMS	GALBP-MMS

Tabla 1.1. Tipos de problemas ALB.

1.4. Problemas de diseño de líneas de montaje (ALDP).

Este tipo de problemas considera las especificaciones de diseño de la línea de producción antes de asignar las tareas a las estaciones. Los problemas de diseño de líneas de montaje comprenden otros problemas tales como la selección del equipo de manufactura entre un conjunto de

posibilidades para cada operación de manufactura, la asignación de las tareas a las estaciones y el equilibrado de la línea, la especificación de las dimensiones de los espacios de almacenaje como *buffers*, los sistemas de transporte, etc.

Rekiek et al. [Rekiek02] consideran que la actualización de los sistemas de producción, caracterizados por una vida útil corta, un alto grado de automatización, aparición de nuevos equipos de manufactura, nuevas tecnologías y grandes inversiones para construir líneas de producción modernas, han generado nuevos problemas de diseño, que han requerido del diseño y/o rediseño de líneas de producción. Rekiek et al. [Rekiek02] ofrecen un estado del arte de los métodos de optimización para el diseño de líneas de montaje.

A continuación se presentan brevemente algunos de los procedimientos utilizados para resolver los problemas de equilibrado de líneas.

1.5. Algoritmos de resolución de problemas de equilibrado de líneas.

Hay numerosos algoritmos desarrollados para resolver problemas de equilibrado de líneas, principalmente para el caso simple (*Simple Assembly Line Balancing Problem*) y particularmente para SALBP-1; entre ellos se distinguen dos grupos: los métodos exactos (basados en programación lineal, programación dinámica y procedimientos *branch&bound*) y los métodos heurísticos que aproximan la solución del problema.

De acuerdo con Plans [Plans99], los métodos exactos garantizan una solución óptima, aunque éstos puede utilizarse en casos con un número muy reducido de tareas, ya que para problemas con un número grande de variables y de restricciones, se hace inabordable el problema en cuestión de tiempos de cálculo; esto, de alguna manera, ha motivado el desarrollo de métodos heurísticos que permiten resolver eficientemente problemas más reales.

Becker y Scholl [Becker03a] presentan un estado del arte totalmente actualizado de los procedimientos exactos y heurísticos para resolver SALBPs; en dicho trabajo, los autores concluyen que los métodos disponibles, que resuelven instancias de problemas de tamaño medio, son efectivos para ser usados en la práctica, pero que requieren mejoras para que puedan resolver problemas de mayor escala. En el mismo trabajo, también se resumen los procedimientos *branch&bound* usados para resolver SALBP-1s, entre los que se encuentran, por ejemplo, FABLE [Johnson88], EUREKA [Hoffman92] y SALOME [Scholl97]. Trabajos previos incluyen los realizados por Baybars [Baybars86] en el que se presenta un estado del arte de los algoritmos exactos desarrollados para resolver SALBPs y el de Ghosh y Gagnon [Ghosh89] en el que, además, se incluyen métodos heurísticos. De acuerdo con Becker y Scholl [Becker03a], la mayoría de los métodos heurísticos están basados en reglas de prioridad y procedimientos enumerativos (ej. algoritmo de Hoffmann [Hoffmann63]); Talbot [Talbot86], Scholl y Voß [Scholl96] y Scholl [Scholl99a] presentan descripciones detalladas de este tipo de procedimientos. También se han propuesto heurísticas basadas en algoritmos genéticos (ej. Rubinovitz y Levitin [Rubinovitz95]), recocido simulado (ej. Suresh y Sahu [Suresh94]) y *tabu search*; por su parte, Baykasoglu et al. [Baykasoglu03] proponen una heurística basada en *optimización de colonias de hormigas* para resolver problemas SALBP-1.

Para ALDPs, Rekiek et al. [Rekiek02] presentan un estado del arte de los métodos para el diseño de líneas de montaje, en el que concluyen que los métodos exactos utilizados para resolver este tipo de problemas están principalmente basados en algoritmos *branch&bound*; además, los autores consideran que los algoritmos académicos no son suficientemente usados en la industria porque, a pesar de ser efectivos y fáciles de usar, éstos usan pocos datos y sufren de pérdida de información resolviendo problemas ficticios en lugar que problemas industriales. Por su parte, Pinnoi y Wilhem [Pinoi98] utilizan un procedimiento *branch and cut* para tratar un problema de diseño de un sistema de montaje para un producto simple; en el caso de diseño de una línea robotizada, Rubinovitz y Bukchin [Rubinovitz93] utilizan un modelo de búsqueda *branch&bound*. He y Kusiak [He97] utilizan un algoritmo *tabu search*, para formular y resolver un problema de configuración de un sistema de ensamblado; Bukchin y Tzur [Bukchin00] proponen una heurística basada en un procedimiento *branch&bound* para diseñar una línea de ensamblado flexible, en donde se tienen varias alternativas de equipos.

Para el caso general, GALBPs, Becker y Scholl [Becker03b] presentan una revisión muy actualizada de los métodos para su resolución. En Erel y Sarin [Erel98] también se puede encontrar un resumen de los procedimientos usados para resolver problemas de equilibrado de líneas. Los enfoques utilizados son muy variados e incluyen: procedimientos constructivos basados en reglas de prioridad (ej. COMSOAL [Arcus66] y Buxey [Buxey74]), algoritmos genéticos como los propuestos por Ponnambalam [Ponnambalam03] para resolver un MALBP, Ruvinobitz [Ruvinoibitz95] para RALBP y Kim et al. [Kim96] para MOALBP, programación lógica restringida como en el procedimiento presentado por Spina [Spina03] para líneas con múltiples productos, lógica difusa (ej. Gen [Gen96]), procedimientos de búsqueda local y meta-heurísticas como *tabu search* (ej. Voss [Voss94], Pastor et al. [Pastor02]), recocido simulado (ej. Vilarinho y Simaria [Vilarinho02] para resolver un MALBP y Erel et al. [Erel01] para UALBP), sistemas expertos, como el propuesto por Phonganant et al. [Phonganant01] para resolver un MALBP. Erel y Gokcen [Erel99] también proponen un procedimiento para resolver MALBP pero utilizando un modelo de la *ruta más corta*; Park et al. [Park97] proponen un algoritmo basado en teoría de redes para resolver un problema de equilibrado de líneas con incompatibilidades; y Bautista y Pereira [Bautista03] adaptan un algoritmo basado en la optimización por colonias de hormigas para resolver un UALBP. También, se utilizan procedimientos exactos para resolver GALBPs: *branch&bound* como el de Sarin et al. [Sarin99] para resolver un problema con tiempos de proceso estocásticos y como el desarrollado por Scholl y Klein [Scholl99b] para UALBP (ULINO); programación entera (ej. Urban [Urban98]); y programación dinámica (ej. Miltenburg [Miltenburg98] y Nicosia et al. [Nicosia02]).

Analizando los trabajos publicados, puede observarse que la mayoría de algoritmos han sido desarrollados para resolver SALBPs. Un número reducido de artículos consideran problemas con estaciones diferentes [Nicosia02], líneas paralelas [Suer98], estaciones paralelas [Bard89], líneas mixtas [Ponnambalam03] y líneas U [Ajenblit03].

Mucho más escasos son los trabajos que incorporan restricciones como incompatibilidades [Park97], restricciones de capacidad [Moon02], tiempos de proceso dependientes de la secuencia [Spina03] o del tipo de operario [Corominas03], tiempos de proceso estocástico [Sarin99], problemas en los que se ubica la carga de trabajo de las estaciones en una cierta ventana de tiempo [Pastor00], casos en donde los datos de entrada no se conocen con certidumbre, o no están disponibles, como por ejemplo *tiempos de proceso difusos* [Gen96], líneas de montaje multi-productos [Pastor02], multi-objetivos [Kim96], alternativas de equipos de manufactura [Bukchin00] y alternativas de proceso [Pinto83].

Es obvio que en los problemas que consideran equipos o procesos alternativos, hay otro problema implícito de secuenciación de las tareas de ensamblado, lo que implica que se debe determinar la forma en que las piezas serán manufacturadas. En el siguiente apartado, se presentan algunos enfoques utilizados para secuenciar tareas en una línea de montaje con rutas alternativas.

1.6. Secuenciación de tareas con rutas de montaje alternativas.

Los problemas de secuenciación de tareas con rutas de montaje alternativas han sido abordados de varias maneras:

1.6.1. Problemas de manufactura flexible.

Los problemas de manufactura flexible son aquellos en los que se consideran procesos alternativos para secuenciar las tareas; conceptos relacionados con este tipo de problemas se encuentran descritos en Crama [Crama97] entre los que se incluyen flexibilidad de manejo de materiales, flexibilidad de procesos y flexibilidad de rutas. Das [Das97] define como ruta al conjunto de estaciones o máquinas (más sus tiempos de proceso) a través de las cuales un producto es procesado y *flexibilidad de rutas* a la capacidad de una facilidad (ej. línea) de procesar un conjunto dado de piezas usando rutas alternativas. Tsubone y Horkawa [Tsubone99] consideran que la flexibilidad de rutas puede ayudar a manejar eventualidades tales como daño de alguna estación, y que ésta puede ser mejorada si se tienen máquinas multipropósito, idénticas y sistemas de manejos de materiales versátiles. Por su parte, Hutchinson y Pflughoeft [Hutchinson94] consideran tres clases de flexibilidad de planes de procesos: 1. flexibilidad de secuencia, que determina la selección de la secuencia de las operaciones, en el caso que se tenga una operación con más de un predecesor o sucesor; 2. flexibilidad de máquinas, que provee una selección de la máquina que ejecutara la operación; y 3. flexibilidad de proceso, que provee caminos alternativos para completar un plan.

Zhao y Wu [Zhao01] proponen un algoritmo genético para resolver un problema de secuenciación de tareas con rutas múltiples; se consideran varios tipos de piezas y varios tipos de máquinas (con varias piezas y máquinas por tipo); el problema presenta flexibilidad de secuencia, lo que implica que los distintos tipos de piezas pueden ser procesados a través de rutas alternativas y flexibilidad de máquinas y, de esta forma, las piezas pueden ser procesadas en cualquier tipo de máquina (lo que podría generar un ligero cambio en el tiempo de proceso de las piezas). Zhao y Wu describen cada ruta de procesamiento alternativa para cada tipo de pieza, a través de un grafo acíclico dirigido cuyos nodos representan los diferentes tipos de máquinas. El grafo de rutas alternativas para cada tipo de pieza es dado y los tiempos de proceso de los caminos de las diferentes rutas son conocidos.

En su artículo, Zhao y Wu, considerando las restricciones de selección de ruta, de selección de máquina y de selección de la secuencia de las operaciones, presentan detalladamente resultados de la aplicación del algoritmo genético a varios casos: un problema tanto de ruta fija como ruta flexible compuesto de dos piezas y tres máquinas; un problema de ruta flexible de cinco piezas y cuatro máquinas; y un problema 127 piezas y 33 tipos diferentes de máquinas en el que se tienen tiempos de entrega diferentes.

Das y Nagendra [Das97] consideran un problema en el que se quiere identificar qué rutas, entre un conjunto con todas las posibles, deben ser implementadas en un sistema de manufactura flexible que minimicen los costos asociados a la flexibilidad de rutas (cada alternativa tiene un costo asociado); en el problema, formulado como un programa entero-mixto, se considera, además, que las rutas requieren diferentes recursos y que éstos no son necesariamente únicos para la ruta.

Zhang y Huang [Zhang94] usan lógica difusa para identificar planes de proceso y para evaluar la contribución de cada uno en el desempeño de la planta de montaje, y, de esta manera definir un conjunto consolidado de alternativas que minimicen los recursos de manufactura requeridos.

1.6.2. Sistemas de manufactura celular con planes de proceso alternativos.

En los sistemas de manufactura celular también se ha considerado la posibilidad de tener rutas de proceso alternativas. Aunque el problema que se describe a continuación no contempla el equilibrado del sistema de manufactura, vale la pena mencionar la manera como manejan la existencia de planes de proceso alternativos.

Rajamani et al. [Rajamani90] consideran un problema de manufacturar un grupo de piezas en el que cada una puede tener planes de proceso alternativos, y, además, cada operación en ese plan puede ser ejecutada en una máquina alternativa. Rajamani et al. construyen tres modelos de programación lineal para estudiar sucesivamente el efecto de los planes de proceso alternativos en la utilización de los recursos mientras que, simultáneamente, se identifican las familias de partes y grupos de máquinas. En los tres modelos se selecciona un plan de proceso para cada pieza y se asignan máquinas considerando restricciones de demanda, costo y tiempo. De acuerdo con Rajamani et al., las rutas alternativas, al considerar, de manera simultánea, los planes de proceso y máquinas alternativas con la formación de familias de piezas y grupos de máquinas, pueden resultar en una eficiente utilización de los recursos.

Logendran y Ramakrishna [Logendran94] proponen una heurística para resolver un problema de manufactura celular en el que se tienen planes de proceso alternativos y flexibilidad de máquinas; en este caso se requiere determinar el número de máquinas de cada tipo y seleccionar un plan de proceso único para cada pieza.

A continuación se presentan problemas de equilibrado de líneas flexibles, esto es, problemas que consideran aspectos alternativos como por ejemplo equipos, procesos o rutas alternativas.

1.7. Problemas de equilibrado de líneas que consideran elementos alternativos.

De los problemas analizados en la literatura que consideran algún tipo de flexibilidad, se distinguen los siguientes:

1.7.1. Equilibrado con alternativas de proceso.

Pinto et al. [Pinto83] consideran un problema en el que se tienen alternativas de proceso (de diferente duración y coste) y desarrollan un modelo matemático para seleccionar las alternativas de manufactura y, a su vez, asignar las tareas a las estaciones de manera que se minimice el costo de procesamiento total; los procesos alternativos, contemplados en el problema, permiten sustituir los de costos fijos más altos por los de costos variables más bajos, reduciendo así la cantidad de trabajo total y, de ser posible, el tiempo ocioso de las máquinas. El modelo considera un nivel de producción deseado y el límite inferior de tiempo de ciclo asociado; cualquier tiempo de ciclo superior a dicho nivel genera porcentajes de sobre tiempo (*over time*), lo que implica que se deben pagar niveles de salarios mas altos. Pinto et al. consideran que no solo se debe tener en cuenta el tiempo total de trabajo sino también el tiempo libre de cada estación como medida de eficiencia de las alternativas de diseño.

El modelo (de programación lineal entera) contempla un *proceso base* que puede ser complementado por uno o más *procesos opcionales alternativos*; además, existe un costo incremental asociado a cada proceso

alternativo que representa el costo incurrido al reemplazar el proceso base. Cada alternativa puede reducir el tiempo de ejecución de una tarea o eliminarla completamente; sin embargo, la relación de precedencias de las tareas se mantiene, es decir, cambia el tiempo de duración de alguna[s] tarea[s] o dos tareas pueden combinarse en una sola, pero sin romper el esquema de precedencias original del problema, lo que implica que las relaciones de precedencias son fijas. Para resolver el modelo, Pinto et al. utilizan un procedimiento *branch&bound*, en el que se considera una *proceso base* y *m* *procesos alternativos* (marcados como *indecisos* al inicio del procedimiento). El algoritmo se ramifica seleccionando o descartando alternativas simples y resolviendo las instancias de los problemas correspondientes a cada configuración.

Pinto et al. exponen un problema con 10 tareas y tres alternativas de proceso (que se representan en la figura 1.15 a través de rectángulos): una disminuye el tiempo de proceso de la tarea 3 de 49 unidades de tiempo a 35; otra, combina las tareas 1 y 2 en una sola con tiempo de proceso 18 en lugar de 21 (la suma de los tiempos de las tareas 1 y 2); y la otra, combina las tareas 6 y 8 con un tiempo de proceso total de 16 unidades de tiempo.

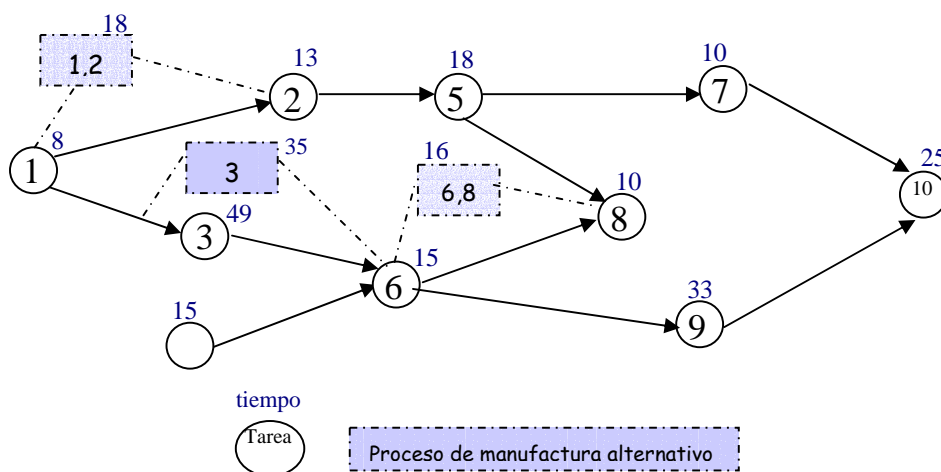


Figura 1.15. Diagrama de precedencias con procesos de manufactura alternativos.

En la tabla 1.2. se muestran, para cada alternativa de manufactura, las tareas afectadas, los tiempos de las tareas para el proceso base y para los alternativos, el ahorro en coste laboral estimado y el coste incremental por unidad de tiempo. La última columna indica el número de estaciones que se obtiene al resolver las tres instancias del problema, considerando únicamente la selección de la alternativa de proceso conjuntamente con el equilibrado de la línea.

Alternativa	Tarea afectadas	Tiempo de la tarea para el proceso base	Tiempo de la tarea para el proceso alternativo	Ahorro en costo laboral	Costo incremental por unidad	Estaciones requeridas
1	3	49	35	14	19	4
2	6,8	25	16	9	6	5
3	1,2	21	18	3	11	5

Tabla 1.2. Datos y resultados del ejemplo de equilibrado con alternativas de proceso de Pinto et al. [Pinto83].

Como se puede observar en la tabla 1.2, la alternativa 2 tiene el menor coste incremental por unidad y por lo tanto proporcionaría la mejor solución del problema, sin embargo, el equilibrado simultaneo junto con la selección de la alternativa de manufactura indica que la mejor solución se obtiene con la alternativa 1 que requiere solo 4 estaciones para cumplir con los requerimientos.

Aplicación: El algoritmo fue utilizado para rediseñar la línea de producción de un proveedor de una gran industria de automóviles, el proceso de producción consta de 50 tareas con 7 alternativas con siete restricciones de zonificación. El objetivo de producción fue 7424 piezas grandes por día.

1.7.2. Problemas con herramientas de manufactura alternativas.

Las decisiones en este tipo de problemas implican la selección de un tipo de herramienta a ser ubicada en las diferentes estaciones. Cada tipo de herramienta tiene un costo individual y un efecto en el tiempo de proceso de las tareas. En este caso, el problema implica de forma simultánea, por un lado, la selección de la asignación de las herramientas a las estaciones correspondientes y, por el otro, la consideración de restricciones de ubicación de las tareas en las estaciones, si éstas requieren un tipo de herramienta particular para poder ser procesadas.

Bukchin y Tzur [Bukchin00] tratan el problema de diseño de líneas de montaje flexible cuando se dispone de varias alternativas de equipos de proceso. En este caso las tareas están sujetas a restricciones de precedencia (fijas). El objetivo es minimizar el coste total de equipamiento dado un tiempo de ciclo predeterminado. Bukchin y Rubinovitz [Bukchin02] también estudian un problema de diseño con alternativas de equipos de proceso considerando estaciones en paralelo.

1.7.3. Asignación de tareas fijas y tareas flotantes.

Park et al. [Park97] consideran un GALBP2 en donde se tiene dos grupos disjuntos de tareas que se definen en la fase de diseño del proceso, uno de tareas fijas y otro de tareas flotantes. Para las tareas fijas se impone una precedencia lineal, lo que implica que una tarea debe ejecutarse después de otra; además, algunos pares de tareas fijas consecutivas no pueden asignarse a una misma estación puesto que son incompatibles entre ellas. Para cada tarea flotante existen un conjunto de rangos definidos en términos de pares de tareas fijas, de forma que cada tarea flotante solo podrá ser asignada entre las tareas fijas especificadas en cualquiera de los rangos; además, para algunos pares de tareas flotantes existen restricciones de precedencia. Por ejemplo, en la figura 1.16 se puede ver que la tarea flotante 1 puede ser insertada después de la tarea fija 1, 2, o después de la tarea 5 tal como lo indica el rango de la tarea: (1,3) y (5,6).

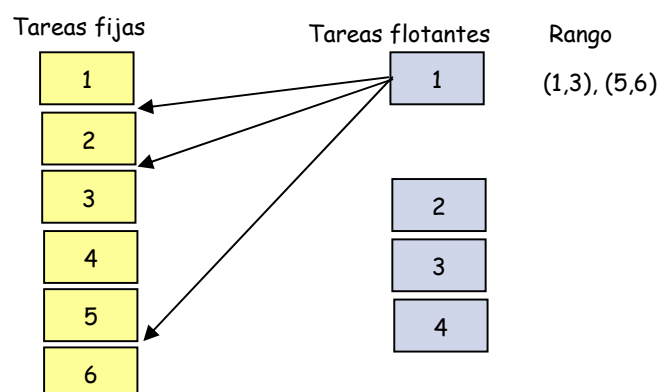


Figura 1.16. Diagrama de tareas fijas y tareas flotantes.

Park et al. proponen un procedimiento heurístico basado en *neighborhood search*, en donde, dada una solución factible, se obtiene una solución mejorada a través de la resolución de dos subproblemas: subproblema 1, se redistribuyen las tareas flotantes mientras se mantiene la asignación de las tareas fijas, con la finalidad de conocer si las tareas flotantes se pueden asignar a las estaciones en el tiempo de ciclo dado, mientras las tareas fijas satisfacen las restricciones de compatibilidad (algunos pares de tareas fijas consecutivas no pueden asignarse a la misma estación debido a que son incompatibles); en el segundo subproblema, se re-optimiza la asignación de las tareas fijas y las flotantes mientras se mantiene el orden relativo de las tareas flotantes, el objetivo de este subproblema es encontrar una asignación de ambos tipos de tareas en las estaciones, de manera que se minimice el número de estaciones requerido dado un predeterminado tiempo de ciclo, se considera, además, una precedencia lineal entre las tareas flotantes que especifica el orden en que son ejecutadas.

1.7.4. Problemas con estaciones alternativas.

En este tipo de problemas se deben instalar un conjunto de estaciones en la línea a seleccionar entre un conjunto de tipos de estaciones no idénticas; Graves y Lamar [Graves83], por ejemplo, consideran un problema de este tipo en donde se asume que la secuencia de proceso de las tareas es fija (grafo de precedencias serial).

Con el fin de poder realizar un análisis comparativo de los problemas tratados en la literatura, que contemplan aspectos alternativos, a continuación se presenta brevemente el problema propuesto que se desea resolver, en el que consideran rutas de montaje alternativas (en la parte III se encuentra una descripción detallada de este problema).

1.7.5. Problema de equilibrado con rutas de montaje alternativas.

En el planteamiento propuesto, se considera un problema en el que se quiere minimizar el número de estaciones requeridas para procesar un determinado número de piezas (es decir, dado el tiempo ciclo); se consideran rutas de montaje alternativas de un único producto, lo que implica que se dispone de relaciones de precedencias alternativas entre las tareas; y, además, se considera que los tiempos de proceso son diferentes y dependen del orden en el que las piezas son procesadas. Los datos de entrada, tiempo ciclo, tiempos de proceso y las rutas de montaje son conocidos de partida. Se considera que la decisión de seleccionar la ruta de montaje en el proceso de equilibrado de la línea, puede proveer una asignación de las tareas que mejore el objetivo planteado.

En la siguiente parte de este trabajo, se realiza un análisis de los problemas presentados en los apartados 1.6 y 1.7. con la finalidad de indagar si el problema propuesto en el apartado 1.7.5 ha sido tratado previamente.

II. Análisis del estado del arte

Tal como puede evidenciarse en los casos descritos en la sección anterior, son escasos los problemas que consideran aspectos alternativos, bien sea de diseño o de proceso, junto con el proceso de equilibrado de la línea.

Varios trabajos involucran la selección del plan de montaje entre un conjunto de alternativas posibles, por ejemplo los planteados por Das y Nagendra [Das97] y Zhang y Huang [Zhang94], en los que, además, se considera la asignación de los recursos de manufactura necesarios para cada alternativa; pero en ninguno de estos dos se considera que los tiempos de proceso son dependientes de la ruta de montaje y tampoco se considera el equilibrado de la línea.

Por su parte, Zhao y Wu [Zhao01] consideran un problema en el que se tienen diferentes tipos de piezas, cada una de los cuales tiene procesos de manufactura alternativos; en contraste, en el problema propuesto todas las piezas son iguales y comparten las mismas secuencias de manufactura alternativas, por lo que, considerando este aspecto, el último problema podría verse como una instancia del primero. Por otra parte, en el problema de Zhao y Wu, los tiempos de proceso no dependen de la secuencia de proceso sino de la ruta seleccionada para procesar la pieza. La diferencia fundamental entre el problema plantado por Zhao y Wu y el propuesto en este trabajo es que el último considera, además, el problema de equilibrar la línea de montaje, mientras que en el primero no.

En el problema presentado por Park et al. [Park97] se consideran restricciones alternativas parciales de precedencia que se ven reflejadas en la consideración de las tareas flotantes, sin embargo, los tiempos de proceso de las tareas son los mismos, sin importar entre qué pares de tareas fijas son insertadas las flotantes; también, se consideran incompatibilidades, no contempladas en el problema propuesto, por lo que un par de tareas podría no poder procesarse de manera consecutiva en una misma estación.

Pinto et al. [Pinto83] son los únicos que tratan el problema de equilibrado de líneas con rutas alternativas. Los autores consideran simultáneamente el proceso de selección de las alternativas de manufactura (definidas por cambios en el tiempo de procesos de una o varias tareas) con la asignación de las tareas a las estaciones, sin embargo, las relaciones de precedencias originales se mantienen; este no es el caso

en el problema propuesto, en donde cada alternativa de montaje tiene un diagrama de precedencias diferente. En el mismo artículo Pinto et al. comentan la posibilidad de que se consideren relaciones de precedencias variables, pero no estudian el caso: *"in practice it is possible that a particular processing alternative can change the nature of the precedence requirements such that the requirements for the replacing tasks are not the same as the union for the requirement of the replaced tasks... Such special situations are not dealt with here"*.

Con respecto a los tiempos de proceso, en la gran mayoría de los problemas referenciados son considerados fijos y conocidos a priori. Hay muy pocos problemas de equilibrado de líneas que consideren tiempos de proceso que sean dependientes de la secuencia; por ejemplo, Pinto et al. [Pinto86], en su problema de alternativas de proceso, consideran que los tiempos dependen de la alternativa de proceso seleccionada, dado que una alternativa puede estar representada solo por el cambio en el tiempo de proceso de una tarea. Es más común encontrar problemas que contemplan tiempos de *setup* dependientes de la secuencia (ej. de Rajendran y Ziegler [Rajendran03] y Kurz y Askin [Kurz03]) que tiempos de proceso dependientes de la secuencia.

Tal como se puede observar en el análisis del estado del arte, el problema de equilibrado de líneas que contempla rutas alternativas, con relaciones de precedencias alternativas y tiempos de proceso dependientes de la secuencia en la que son procesadas las piezas, no ha sido abordado hasta el momento. Este problema se presenta en detalle a continuación.

III. Problema de equilibrado de líneas con rutas alternativas y tiempos variables.

3.1. Introducción

En esta parte del trabajo se define y caracteriza un nuevo problema de equilibrado de líneas en el que se consideran rutas de montaje alternativas, y se presenta un par de ejemplos en los que se demuestra que considerando rutas alternativas se puede obtener una mejor solución a un ALBP.

3.2. Definición del problema.

El caso particular que se enfoca aquí describe un problema complejo en el que se consideran conjuntamente el proceso de toma de decisiones acerca del orden como se ejecutarán las tareas en un sistema de montaje y el proceso de equilibrado de la línea, disponiendo de rutas de montaje alternativas.

En la mayoría de los problemas de equilibrado de líneas se supone una relación rígida entre las tareas, lo que implica que las piezas pueden ser procesadas solo de acuerdo a un plan de montaje específico y, por tanto, existe un diagrama de precedencias fijo y único; en la figura 3.1. se puede ver un ejemplo de un diagrama de precedencias de las piezas que componen una linterna, dicho diagrama define el plan de montaje único, que restringe el orden el cual las piezas pueden ser ensambladas.

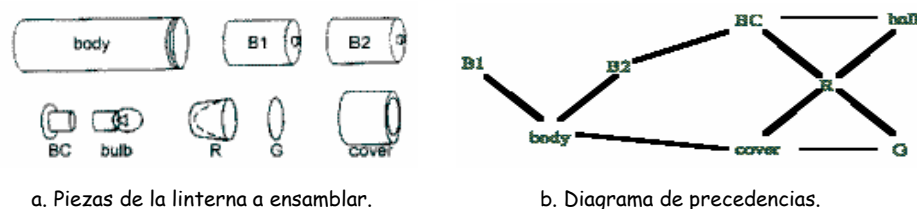


Figura 3.1. Esquema de montaje de una linterna⁸.

En el caso que se plantea en este trabajo, se considera *flexibilidad de rutas*: las tareas [piezas] se pueden procesar [ensamblar] de varias formas, lo que implica que para generar el producto final no existe un único diagrama de precedencias sino diagramas de precedencias alternativos; se considera que los tiempos de proceso de las tareas no son fijos sino dependientes del orden en el que las piezas son procesadas, es decir, dependen de la alternativa de montaje seleccionada, por lo que para cada alternativa se puede obtener un tiempo de proceso diferente.

Bajo estas consideraciones, se requiere, de manera simultánea, seleccionar el orden en el que se procesan las tareas (lo que implica determinar, además, la duración de las tareas) y asignar dichas tareas a las estaciones, de manera que, dado un tiempo ciclo, se minimice el número de estaciones requeridas para procesarlas (ver los ejemplos 3.1. y 3.2).

⁸ Ejemplo tomado de Gallo y Scutellà [Gallo02].

El problema general implica, entonces, resolver simultáneamente dos subproblemas: uno, decidir el orden de proceso (la ruta) de aquellas piezas que tengan relaciones de precedencia alternativas y, dos, equilibrar la línea.

En el ejemplo 3.1, que se presenta a continuación, se puede observar que considerando rutas alternativas (que pueden tener mayor carga de trabajo total), se puede obtener una mejor solución al equilibrar la línea de montaje.

Ejemplo 3.1. Primer ejemplo de equilibrado de líneas con rutas alternativas.

En la figura 3.2. se dispone de dos grafos alternativos que representan la relación de precedencias de cuatro tareas A, B, C y D, respectivamente; cada nodo en el grafo representa a una tarea; y el número en la parte superior de los nodos indica el tiempo de proceso de la tarea respectiva.

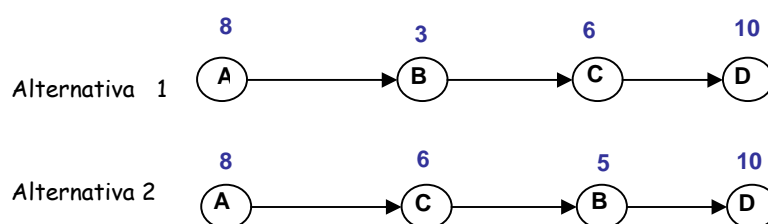


Figura 3.2. Diagramas de precedencias alternativos.

En la alternativa 2, se intercambia el orden de proceso de las tareas B y C, y, tal como se puede ver en la figura 3.2, si la tarea C se procesa después de B, su tiempo de proceso aumenta de 3 a 5 unidades de tiempo.

En la tabla que sigue se muestran los resultados que se tienen al equilibrar cada uno de los problemas alternativos resultantes, considerando un tiempo de ciclo de 15 unidades de tiempo:

Alternativa	Actividades por Estación (carga)			Tiempo total de proceso	Número de estaciones
	I	II	III		
1	A,B (11)	C (6)	D (10)	27	3
2	A,C (14)	B,D (15)	-	29	2

Tabla 3.1. Datos y resultados del ejemplo 3.1.

Sin realizar los equilibrados, se podría haber elegido a priori la alternativa 2 por ser la que tiene la menor carga de trabajo total; sin embargo, si se considera la selección de la ruta de montaje junto al equilibrado de la línea, la alternativa 1 proporciona la mejor solución al problema puesto que solo requiere dos estaciones, en lugar de las tres que requiere la alternativa 1 (véase la tabla 3.1).

La posibilidad de disponer de rutas de montaje alternativas del producto no solo permite el tratamiento de problemas más reales sino también favorece la asignación de tareas que minimice el número de estaciones requeridas; esto mismo también se puede observar en el segundo ejemplo que se presenta a continuación.

Ejemplo 3.2. Segundo ejemplo de equilibrado de líneas con rutas alternativas.

En este ejemplo se consideran dos rutas alternativas en el proceso de decorado (colocación de pegatinas) y montaje del carenado de una moto. Las tareas a ejecutar, así como sus tiempos de proceso, para cada una de las dos alternativas, se presentan en la siguiente tabla:

Actividades	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Tiempo de proceso	Precedencias	Tiempo de proceso	Precedencias
A: Montaje del carenado en la motocicleta.	13	-	13	B, C, D y E
B: Decorado con pegatina amarilla.	6	A	5	-
C: Decorado con pegatina azul.	7	A	5	-
D: Decorado con pegatina de texto.	8	A	8	-
E: Decorado con pegatina negra.	4	A	4	-
F: Rectificación y ajuste (revisión).	7	B, C, D y E	7	A

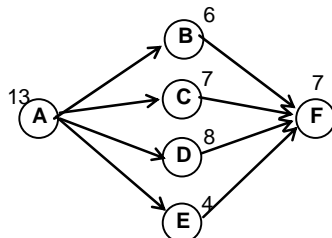
Tabla 3.2. Datos del ejemplo 3.2.

En la figura 3.2. se pueden ver las dos alternativas de proceso en las que se parte de que la motocicleta⁹ esta casi ensamblada y que solo requiere del carenado y ajuste para completarse.

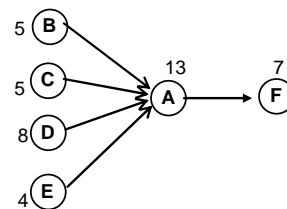


Figura 3.3. Rutas alternativas para el problema de carenado de moto.

Alternativa 1: Primero se coloca el carenado en la moto (tarea A), luego se procede con el decorado (tareas B, C, D y E) y finalmente se realiza la rectificación y ajuste (tarea F).



Alternativa 2: Primero se decora el carenado (tareas B, C, D y E), luego el carenado decorado es montado en la motocicleta (tarea A) y finalmente se realiza la rectificación y ajuste (tarea F).



En este ejemplo se considera que algunas tareas requieren menos tiempo de proceso cuando se realiza el decorado del carenado desmontado; por tanto, los tiempos de las tareas B y C disminuyen en la alternativa 2, como se puede ver en la tabla 3.2 y en los diagramas de precedencia de las alternativas.

⁹ Las fotografías usadas se encuentran en <http://www.hisinsa.com/hisinsa/Paginas/monograficos/Tamiya/14092/principal.htm>.

Los resultados del ejemplo 3.2, considerando un tiempo de ciclo de 17 unidades de tiempo, se presentan en la tabla 3.3:

Alternativa	Actividades por Estación (carga -tiempo)				Tiempo total de proceso	Número de estaciones
	I	II	III	IV		
1	A,E (17)	C,D (15)	B,F(13)	-	45	3
2	B,E,D (17)	C(5)	A(13)	F(7)	42	4

Tabla 3.3. Resultados del ejemplo 3.2.

Si únicamente se considera un problema de secuenciación de tareas, la alternativa 2 proporciona la mejor solución al problema, dado que la carga de trabajo total es menor que la de la alternativa 1. Sin embargo, si se combina la asignación de las tareas a las estaciones con el proceso del equilibrado de la línea, la mejor solución la ofrece la alternativa 1 (3 estaciones), aun siendo la alternativa con mayor carga de trabajo total. Obsérvese (ver tabla 3.3) que la alternativa 2 requiere 4 estaciones.

A través de los ejemplos 3.1 y 3.2, se puede observar cómo un sistema de montaje se sub-optimiza, cuando no se tienen en cuenta las repercusiones de las posibles rutas de montaje sobre el equilibrado de la línea.

En lo que sigue, se plantean una serie de aspectos que deben considerarse en la formulación del problema propuesto.

3.3. Caracterización del problema.

El problema de equilibrado de líneas con rutas de montaje alternativas se puede caracterizar de la siguiente manera:

1. El tiempo de ciclo (o tasa de producción) es conocido y fijo.
2. Las tareas no se pueden ejecutar en un orden arbitrario dado que se tienen requerimientos de precedencia.
3. No se dispone de una relación de precedencias única entre las tareas sino que se tienen un conjunto de relaciones de precedencia alternativas conocidas.
4. Se desea minimizar el número de estaciones.
5. Los tiempos de proceso de las tareas son conocidos, dependientes de la ruta de montaje, pero independientes de la estación en donde las tareas son procesadas.
6. Todas las estaciones están igualmente equipadas por lo que cualquier tarea puede ser procesada en cualquier estación.
7. Las tareas no se pueden dividir entre dos o más estaciones.
8. No hay tiempos de proceso de las tareas mayores del tiempo de ciclo.
9. Los tiempos de *setup* son despreciables.
10. Cada estación procesa una sola tarea a la vez.
11. Todas las tareas deben ser procesadas una única vez.
12. No se considera tiempo de transporte de las piezas entre una estación y otra.
13. Las tareas pasan solo una vez por una estación (se considera una línea serial).
14. No existe incompatibilidad de tareas, es decir, cualquier par de tareas puede ejecutarse en una misma estación.
15. La línea está diseñada para un modelo único de un producto simple.

Conclusiones

Estudiando la revisión bibliográfica realizada, se presenta una clasificación de los problemas de equilibrado de líneas así como de los enfoques usados para resolverlos. Después de analizar los trabajos publicados, se puede observar que la mayoría trata problemas de equilibrado de líneas simples. Los casos generales que se contemplan son bastantes restrictivos, siendo muy escasos los problemas que consideran aspectos alternativos.

Se define y presenta un problema general en el que se combina el proceso de decisión acerca de las rutas de montaje con el proceso de equilibrado de la línea; se considera flexibilidad de rutas, de forma que se dispone de un conjunto de diagramas de precedencias alternativos que representan a cada ruta de montaje alternativa; además, se considera que los tiempos de proceso de las tareas dependen de la secuencia de proceso, por lo que cada ruta implica un tiempo de proceso de las tareas total diferente.

Los problemas de equilibrado de líneas son muy difíciles de resolver dada su naturaleza combinatoria (son NP-hard), por ello el problema propuesto, al considerar rutas alternativas, impone un alto nivel de complejidad.

Los problemas de equilibrado de líneas con rutas de montaje alternativos no han sido estudiados previamente; solo Pinto et al. [Pinto83] tratan un problema similar que considera procesos de manufactura alternativos, sin embargo, las alternativas se representan a través del cambio en el tiempo de proceso de una o más tareas pero sin alterar las relaciones de precedencia originales de las tareas.

Referencias

- [Ajenblit03] Ajenblit, D. y Wainwright, R.L. Applying genetic algorithms to the U-Shaped assembly line balancing problem. The University of Tulsa. 2003. <http://www.mcs.utulsa.edu/~rogerw/papers/Ajenblit-ICEC98.pdf>
- [Arcus66] Arcus, A.L. COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines, International Journal of Production Research 4, 259-277. 1966.
- [Bard89] Bard, J. Assembly line balancing with parallel workstations and dead times. International Journal of Production Research. Vol. 37, No. 4, 721-736. 1999.
- [Bartholdi93] Bartholdi, J.J. Balancing two-sided assembly lines: A case study, International Journal of Production Research 31, 2447-2461. 1993.
- [Bautista03] Bautista, J. y Pereira, J. Algoritmos de hormigas para un problema de equilibrado de líneas. V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid-Burgos. 2003.
- [Baybars86] Baybars, I. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem" Management Science, 32, 909-932, 1986.
- [Baykasoglu03] Baykasoglu, A., Dereli, T., Erol, R. y Sabuncu, I. An ant colony based optimization algorithm for solving assembly line balancing problems. International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks-TAINN 2003. <http://www.ijci.org/products/tainn/E08004.pdf>.
- [Becker03a] Becker, C. y Scholl, A. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. Technical Report 20/2003; Friedrich-Schiller-Universität Jena (Invited review for the special issue: "Balancing of automated assembly and transfer lines" of the European Journal of Operational Research), 2003.
- [Becker03b] Becker, C. y Scholl, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. Invited review for the special issue: Balancing of automated assembly and transfer lines of the European Journal of Operational Research, 2003.
- [Bukchin00] Bukchin, J. y Tzur, M. Design of flexible assembly line minimize equipment cost. IIE Transactions. 32, 585-598. 2000.
- [Bukchin02] Bukchin, J. y Rubinovitz, J. A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. IIE Transactions 35, 000-000. 2002.
- [Buxey74] Buxey, G.M. Assembly line balancing with multiple Stations, Management Science 20, 1010-1021. 1974.
- [Corominas03] Corominas, A., Pastor, R. y Plans, J. Líneas de montaje con tiempos dependientes del tipo de operario. 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa Lleida, 8-11 de abril de 2003.
- [Crama97] Crama, Y. Combinatorial optimization models for production scheduling in automated manufacturing systems. European Journal of operational research. 99, 136-153. 1997.
- [Das97] Das, S.K. y Nagendra, P. Selection of routes in a flexible manufacturing facility. International Journal of Production Economics 48, 237-247. 1997.

- [Erel01] Erel, E., Sabuncuoglu, I. y Aksu, B.A. Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing, *International Journal of Production Research* 39, 3003-3015. 2001.
- [Erel98] Erel, E. y Sarin, S.C. A survey of the assembly line balancing procedures, *Production Planning & Control* 9, 414-434. 1998.
- [Erel99] Erel, E. y Gokcen H. Theory and Methodology: Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 116, 194±204, 1999.
- [Gallo02] Gallo, G. y Scutellà M.G. A note on minimum makespan assembly plans. *European Journal of Operational Research*. 142. 309-320. 2002.
- [Gen96] Gen, M., Tsujimura, Y. y Li, Y. Fuzzy assembly line balancing using genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 31, no. 3/4, pp. 631-634. 1996.
- [Ghosh89] Ghosh, S. y Gagnon, R.J. A comprehensive literature review and analysis of the design, balacing and scheduling of assembly systems. *International Journal of production research*, vol. 27, no. 4, 637-670. 1989.
- [Graves83] Graves, S.C. y Lamar, B.W. An integer programming procedure for assembly system design problems, *Operations Research* 31, 522 - 545. 1983.
- [He97] He, D.W. y Kusiak, A. Design of Assembly Systems for Modular Products. *IEEE Transactions on Robotics and automation*. Vol. 13, No.5, October 1997.
- [Hoffmann63] Hoffmann, T.R. Assembly line balancing with a precedence matrix, *Management Science* 9, 551-562. 1963
- [Hoffmann92] Hoffmann, T.R. EUREKA: A hybrid system for assembly line balancing. *Management Science*. Vol. 38, No.1 January 1992.
- [Hutchinson94] Hutchinson, G.K. y PFlughoeft, K.A. Flexible process plan: their value in flexible automation systems. *International Journal of Production Research*, vol. 32, 707-719. 1994.
- [Johnson88] Johnson, R.V. Optimally balancing large assembly lines with FABLE. *Management Science* Vol. 34, 240-253, 1988.
- [Kim96] Kim, Y.K., Kim, Y.J. y Kim, Y. Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives. *Computers Industrial Engineering*. Vol. 30, No.3, pp. 397-409. 1996.
- [Kurz03] Kurz, M.E. y Askin, R.G. Comparing scheduling rules for flexible flow lines. *International Journal of Production Economics* 85, 371-388. 2003
- [Lee00] Lee, Q. How to balance manufacturing work cell. *Institute of Industrial Engineers - IE Solutions Conference*, Cleveland Ohio. May 21-23, 2000.
- [Logendran94] Logendran, R., Ramakrishna, P. y Sriskandarajah, C. Tabu search-based heuristic for cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans. *International Journal of production research*, vol. 32, n0.2, 273-297. 1994.
- [Miltenburg98] Miltenburg, J., Balancing U-lines in a multiple U-line facility, *European Journal of Operational Research*, 109, 1-23. 1998.

[Moon02] Moon, C., Lee, M., Seo, Y. y Lee, Y.H. Integrated machine tool selections and operation sequencing capacity and precedence constraints using genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*. 43, 605-621. 2002

[Nicosia02] Nicosia, G., Pacciarelli, D. y Pacifici, A. Optimally balancing assembly lines with different Workstations. *Discrete Applied Mathematics* 118, 99-113. 2002.

[Park97] Park, K., Park, S. y Kim, W. A heuristic for an assembly line balancing problem with incompatibility, range, and partial precedence constraints. *Computers industrial Engineering* Vol. 32. No. 2, pp. 321-332, 1997.

[Pastor00] Pastor, R. y Corominas, A. Assembly line balancing with incompatibilities and bounded workstation loads. *RICERCA OPERATIVA, Journal of the Italian Operations Research Society*; 30 (93), 23-45, 2000.

[Pastor02] Pastor, R., Andres, C., Duran, A. y Perez, M. Tabu search algorithms for an industrial multi-product, multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of task dispersion, *Journal of operational research society* 53, 1317-1323. 2002.

[Phongnasant01] Phongnasant, S., Yang, Y.N., Leep, H.R. y Parsaei, H.R. Expert System for Mixed-Model Assembly Line Balancing. Dallas, TX: 10th Annual Industrial Engineering Research Conference. 2001.

[Pinnoi98] Pinnoi, A. y Wilhelm, W. Assembly System Design: A Branch and Cut Approach. *Management science*, Vol. 44, No. 1, January 1998

[Pinto83] Pinto, P.A., Dannenbring, D.G. y Khumawala B.M. Assembly line balancing with processing alternatives: an application. *Management science*. Vol. 29, No. 7, July 1983.

[Plans99] Plans, J. Classificació, modelització i resolució dels problemes de disseny i assignació de tasques en línies de producció. Tesis Doctoral; UPC; 1999.

[Ponnambalam03] Ponnambalam, S.G., Aravindan, P. y Subba Rao, M. Genetic algorithms for sequencing problems in mixed model assembly lines *Computers & Industrial Engineering*, vol. 45, Issue 4, Pages 669-690. December 2003.

[Rajamani90] Rajamani, D., Singh, N. y Aneja, Y.P. Integrated design of cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plan. *International Journal of Production Research*. Vol. 28, n0. 8, 1541-1554. 1990.

[Rajendran03] Rajendran, C. y Ziegler, H. Scheduling to minimize the sum of weighted flowtime and weighted tardiness of jobs in a flowshop with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research* 149, 513-522. 2003.

[Rekiek02] Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A. y Bratcu, A. State of art of optimization methods for assembly line design, *Annual Reviews in Control* 26, 163-174. 2002.

[Rubinovitz93] Rubinovitz, J. y Bukchin, J. RALB - A heuristic algorithm for design and balancing of robotic assembly lines, *Annals of the CIRP* 42, 497-500. 1993.

[Rubinovitz95] Rubinovitz, J. y Levitin, G. Genetic algorithm for assembly line balancing. *International Journal of Production Economics*. 41, 343-354. 1995.

- [Sarin99] Sarin, S., Erel, E. y Dar-El, E. A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Management Science*. 525-535. 1999.
- [Scholl96] Scholl, A. y Voss, S. Simple assembly line balancing - Heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2, 217-244, 1996.
- [Scholl97] Scholl, A. y Klein, R. SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 9, 319-334, 1997.
- [Scholl99a] Scholl, A. *Balancing and sequencing of Assembly lines*. Physica-Verlag, 1999.
- [Scholl99b] Scholl, A. y Klein, R. ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*. Vol. 37, No. 4, 721-736. 1999.
- [Spina03] Spina, R., Galantucci, M. y Dassisti, M. A hybrid approach to the single line scheduling problem with multiple products and sequence-dependent time. *Computers & Industrial Engineering* Volume 45, Issue 4 , Pages 573-583, December 2003.
- [Suer98] Suer, G. Designing Parallel assembly lines. *Computers in Industrial Engineering*. Vol. 35, Nos. 3-4, pp.467-470. 1998.
- [Suresh94] Suresh, G. y Sahu, S. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing, *International Journal of Production Research* 32, 1801 - 1810. 1994.
- [Talbot86] Talbot, F., Patterson, J.H. y Gehrlein, W.V. A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. *Management Science*. Vol 32. No.4, April 1986.
- [Tsubone99] Tsubone, H., Horikawa, M. A comparison between machine flexibility and routing flexibility, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, 83-101. 1999.
- [Urban98] Urban, T.L. Note. Optimal balancing of U-shaped assembly lines, *Management Science* 44, 738-741. 1998.
- [Vilarihno02] Vilarihno, P. y Simaria, A. A two-stage heuristic methos for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of production research*, Vol. 40, No.6, 1405-1420. 2002
- [Voss94] Voss, S. "Tabu search in manufacturing". In H. Dyckhoff, U. Derigs, M. Salomon and H. C. Tijms (editors.), *Operational Research Proceedings*, pgs. 183-194. 1993.
- [Wikipedia03] *web page*: http://www.wikipedia.org/wiki/Assembly_line. Visitada: Abril de 2004.
- [Witney03] Whitney, D.E. *Assembly sequence analysis*. web page visitada: diciembre de 2003. <http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Mechanical-Engineering/2-875Mechanical-Assembly-and-Its-Role-in-Product-DevelopmentFall2002/BEEB83EE-B310-41CD-BFAA-75B3A1379932/0/Class10AssemblySequences.pdf>
- [Zhang94] Zhang, H.C. y Huang, S.H. A fuzzy approach to process plan selection. *International journal of production research*, vol. 32, n0. 6, 1265-1279. 1994.
- [Zhao01] Zhao, C. y Wu, Z. A Genetic Algorithm Approach to the Scheduling of FMSs with Multiple Routes. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 13, 71-88, 2001.